



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

v. 4, n. 1, p. 3 -18, jan./dez. 2014

revista
eletrônica de
Energia

ANÁLISE DE HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UMA CENTRAL TELEFÔNICA

Clovis Andrade de Almeida

Universidade Salvador, Brasil
ck21br@gmail.com

Daniel Barbosa

Universidade Salvador, Brasil
daniel.barbosa@pro.unifacs.br

RESUMO

Este artigo apresenta a análise dos resultados de medições feitas em campo com osciloscópio e analisador de energia nos terminais de saída de um sistema de geração própria formado por um Grupo Motor Gerador trifásico acionado por motor a óleo diesel em uma central de grande porte de um sistema telefônico. A análise teve como foco os possíveis efeitos das componentes harmônicas não somente sobre o próprio alternador bem como sobre as cargas sensíveis e possíveis impactos sobre os indicadores operacionais da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). São sugeridas etapas de um procedimento operacional e aprofundamento dos estudos para mitigar possível agravamento com o inevitável crescimento das cargas não lineares no sistema telefônico.

Palavras-chave: Geração própria; Central; Sistema telefônico; Componentes harmônicas; Cargas sensíveis; Procedimento operacional.

ABSTRACT

This article intends to introduce the results of field measurements assisted by oscilloscope and power analyser at the output of a self-generation plant including three-phase generator driven by a diesel oil engine in a major Central Office of a telephone system. Such an analysis aimed the harmonic components effects not only to the generator itself but also to sensitive loads and operational parameters stated by Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Both operational procedures and research advances are suggested to mitigate worsening of the effects due to non-linear loads increase in the telephone system.

Keywords: Self-generation; Central Office; Telephone system; Harmonic components; Sensitive loads; Operational procedures.

1 INTRODUÇÃO

A existência de distorções na forma de onda e de assimetrias nas tensões e nas correntes dos sistemas polifásicos é um assunto quase tão antigo quanto o próprio sistema elétrico de corrente alternada (DECKMANN e POMILIO, 2005; CRUZ; PESSANHA, 2013).

Os fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) são inerentes à operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e afetam todos os tipos de consumidores com diversos tipos de efeito, como aquecimento, interrupção de fornecimento, dentre outros (BEATY *et al.*, 2012). Diante da importância da QEE para o funcionamento do SEP, várias normas e resoluções sobre o tema foram criadas, destacando-se os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8 (ANEEL, 2012), que é tratada em caráter oficial pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Brasil, tanto em relação à qualidade do produto quanto à qualidade do serviço. Esta resolução define as metodologias de medição, os

indicadores, o limite e os valores de referência, porém apenas para concessionárias de fornecimento de energia elétrica (COLNAGO et al., 2011).

Dentre os vários fenômenos de QEE, os componentes harmônicos se sobressaem, uma vez que estão presentes nos diversos níveis de tensão e podem causar não apenas impactos na alimentação de cargas sensíveis, mas também interferências eletromagnéticas em sistemas de comunicações (RASHID, 1999). Por estas razões, as empresas de telecomunicações são consumidores sensíveis ao suprimento de energia elétrica com baixos padrões de qualidade, principalmente devido às harmônicas e as interrupções de fornecimento de energia.

No tocante às harmônicas, é importante que haja redução considerável nas componentes de alta frequência das correntes por serem elas que geram os campos magnéticos mais severos do ponto de vista de interferência nos circuitos telefônicos. Em nível analógico, a faixa dos circuitos situa-se entre 300 e 4000 Hz. Em nível digital, a amostragem do sinal de voz é feita a partir de uma portadora pulsada com frequência de 8000 Hz. Estas características deixam o sistema telefônico bastante vulnerável às componentes harmônicas de valores mais elevados. No caso das interrupções, as empresas telefônicas costumam implantar seus sistemas de geração própria, visto que o serviço de telefonia é considerado de utilidade pública e é fiscalizado pela ANATEL conforme o Plano Geral de Metas de Qualidade (PGMQ) (ANATEL, 2002).

A geração própria como uma alternativa de suprimento de energia elétrica não é fiscalizada pela ANEEL, pois não se trata de serviço público. Existe, entretanto, preocupação por parte das concessionárias de energia elétrica no que diz respeito à grande quantidade de cargas não lineares geradoras de harmônicas nas centrais telefônicas e que se propagam pela rede. Tal preocupação se deve não somente à distorção harmônica como também à redução do fator de potência na interface com a concessionária (BHUVANESWARI et al., 2011). É factível salientar que poucos estudos que relacionam as centrais telefônicas e a QEE foram encontrados na literatura correlata, bem como sobre os problemas entre geração própria e QEE.

Com o objetivo de aumentar a compreensão sobre a QEE e o funcionamento das centrais telefônicas, Caciotta e outros (2008) e Leccese (2007) realizaram medições de qualidade de energia em quatro centrais telefônicas de grande porte da cidade de Roma (Itália), e verificaram que os baixos índices de QEE podem afetar o serviço telefônico, principalmente devido às interrupções provocadas por sobretensões. É importante enfatizar que nenhum levantamento foi apresentado quanto às harmônicas, limitando-se apenas aos efeitos das potências reativas, tanto capacitivas quanto indutivas. Além disso, não foi exposto qualquer comparativo entre a energia da concessionária e o sistema de geração própria da companhia telefônica pesquisada.

É factível destacar que as redes que compõem o sistema telefônico moderno são dotadas de equipamentos sofisticados, muitos dos quais são controlados por sistemas microprocessados. Em razão disso, a QEE deve ser sempre observada, independentemente de o fornecimento ser da concessionária ou do sistema de geração própria.

O sistema de geração própria compreende um GMG e uma fonte de corrente contínua (conversor CA-CC, conversor CA-CA e acumuladores), juntamente com a Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA) e Unidade de Supervisão de Corrente Contínua (USCC). O conversor CA-CC da planta analisada é um retificador de seis pulsos.

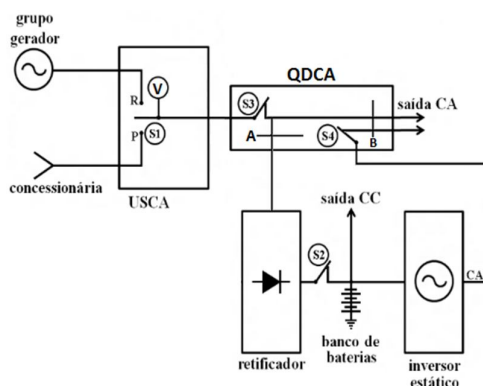
Neste contexto supracitado, o presente artigo apresenta um estudo da distorção harmônica causada pela central telefônica ao sistema de geração própria, bem como uma proposta de mitigação. É importante destacar que a relevância deste artigo está na escassez de estudos dos efeitos da QEE sobre o sistema de geração própria de centrais telefônicas, uma vez que a distorção harmônica irá se propagar pelos circuitos alimentados pelo Grupo Motor Gerador (GMG) dentro do próprio ambiente da central.

3 CONFIGURAÇÃO DOS TESTES

O levantamento de dados foi realizado em uma central de grande porte, visto que esta apresenta uma quantidade significativa de cargas não lineares e essenciais, necessitando, portanto, de sistema de geração própria.

Na Figura 1 é mostrada a topologia típica de um sistema de energia para as cargas essenciais em uma central telefônica de grande porte, objeto deste estudo, visto que somente tais cargas são alimentadas pelo grupo gerador.

Figura 1 - Topologia do sistema de energia para as cargas essenciais



É possível observar na Figura 1 que o sistema de suprimento de cargas essenciais pode ser alimentado pela concessionária ou pelo GMG, e é composto pela USCA, pelo retificador, pelo inversor estático e banco de baterias, que fazem parte da Fonte Ininterrupta de Energia (FIE) com capacidade de 3000 amperes, e pelas chaves de controle.

Em situações normais, isto é, com o fornecimento da energia pela concessionária, a chave S1 tem o contato transferido para o ponto P, alimentando tanto o retificador como as cargas essenciais (S3 fechada). O retificador, por sua vez, alimentará os equipamentos que operam com CC e manterá as baterias carregadas (chave S2 fechada). Em caso de anormalidade no fornecimento de energia da concessionária, a USCA, que monitora os níveis de tensão e de frequência, transferirá o contato da chave S1 para o lado R. A chave S4 fica normalmente fechada para assegurar continuidade de energia às cargas sensíveis (como é o caso dos computadores) durante a transição da chave da posição P para a posição S. As estações repetidoras, pela simplicidade dos equipamentos, não são contempladas com inversores, exceto em casos excepcionais.

O ambiente utilizado para teste foi configurado com a topologia em condições normais, isto é, com as cargas alimentadas pela energia da concessionária. Desta forma, simulou-se uma falta de energia da rede comercial por meio da comutação da chave S1 para o lado R, mantendo-se as chaves S2, S3 e S4 fechadas. Suas aberturas ocorrem apenas em caso de necessidade de intervenção nos equipamentos a ela associados, normalmente em ações de manutenção corretiva ou programada.

As especificações do motor e do gerador testados estão mostradas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Dados do motor

Cilindros	6
Potência	540 CV
Rotação	1800 rpm
Faixa de temperatura	20 °C a 45 °C

Tabela 2 - Dados do gerador

Fases	3, com neutro aterrado
Potência aparente	420 kVA
Tensões	220/127 VCA
Frequência	60 Hz
Corrente nominal	Corrente: 1100 A
Tensão de excitação	136 VCC
Corrente de excitação	25,1 A
Fator de potência	0,8
Temperatura ambiente máxima	60 °C

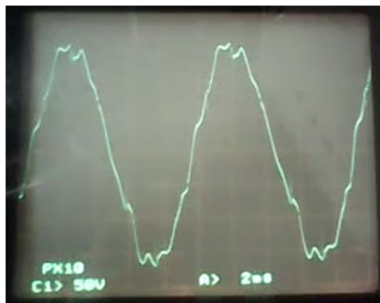
Inicialmente, as tensões foram medidas com osciloscópio nos terminais de entrada do voltímetro V do painel frontal da USCA (Figura 2). Para a análise quantitativa, foi utilizado um analisador de qualidade de energia no domínio da frequência, com registros das distorções nas componentes harmônicas até a de ordem 25. Estas medições foram feitas no barramento A do quadro geral de distribuição de corrente alternada (QDCA).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise levou em conta que a distância entre os terminais do alternador e o ponto de medição mais distante é da ordem de 15 m, o que torna a resistência de curto circuito desprezível. Assim, a impedância de curto circuito é influenciada fortemente pela reatância indutiva interna do alternador, a qual depende da frequência. Logo, as componentes harmônicas elevarão a impedância interna do alternador e, consequentemente, as tensões harmônicas fornecidas por ele às cargas sensíveis ficarão aumentadas. Além das cargas sensíveis às harmônicas, os diversos condutores que interligam os equipamentos devem ser incorporados a elas, porquanto são capazes de captar variações temporais de campos eletromagnéticos capazes de interferir no funcionamento de vários dispositivos.

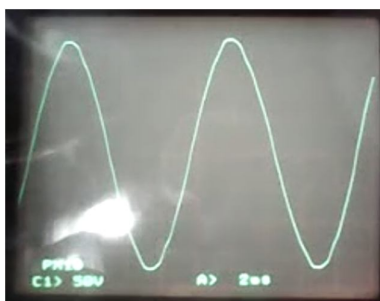
Inicialmente, foi dada a partida do sistema de geração própria e a transferência de carga da concessionária para o GMG. Em seguida algumas medições qualitativas foram realizadas com o osciloscópio, nas quais foram observadas algumas distorções nas formas de onda de tensão, conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2 - Forma de onda da tensão do GMG, com carga, totalmente distorcida com a presença de harmônicas



É possível observar na Figura 3 que o conteúdo harmônico presente no sistema de suprimento da central telefônica aumenta quando este é alimentado pelo GMG, quando comparado com a alimentação proveniente da concessionária, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Forma de onda da tensão da rede da concessionária.

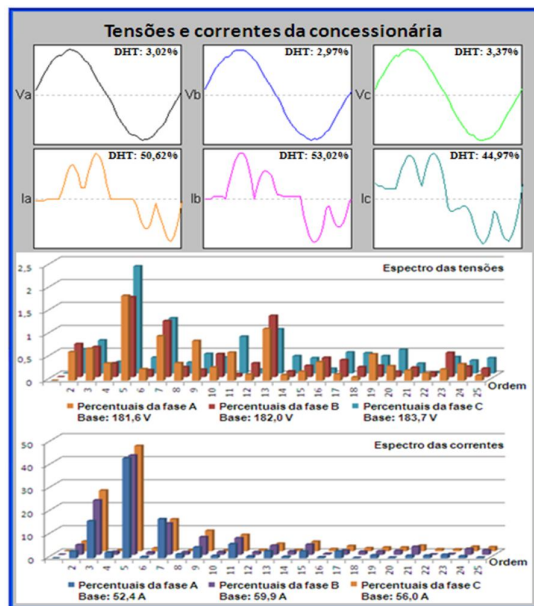


Após a constatação da presença dos distúrbios, foi feita uma análise no banco de dados que registra os indicadores operacionais do sistema telefônico, antes mesmo de realizar as medições com o analisador de energia, com o intuito de verificar eventuais violações dos indicadores. A informação fornecida pelo corpo técnico foi que os resultados encontrados não indicaram quaisquer diferenças nos indicadores, independentemente do tipo de alimentação utilizada. Entretanto, há indícios da existência de alterações que não podem ser divulgadas por se tratarem de informações sensíveis.

Com a coleta das informações por meio do analisador da QEE, os dados foram avaliados com o auxílio do *software* ANAWIN versão 3.16 e contemplaram as componentes harmônicas até a 25ª ordem.

A Figura 4 apresenta os gráficos das tensões e das correntes trifásicas, com os respectivos espectros de frequência, do sistema de suprimento das cargas essenciais por meio da concessionária. É possível observar que em todas as fases, os valores da distorção harmônica das tensões estão dentro dos limites determinados pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, que é de 10% para tensões inferiores a 1 kV.

Figura 4 - Componentes harmônicos e formas de onda das tensões e das correntes (carga alimentada pela concessionária)



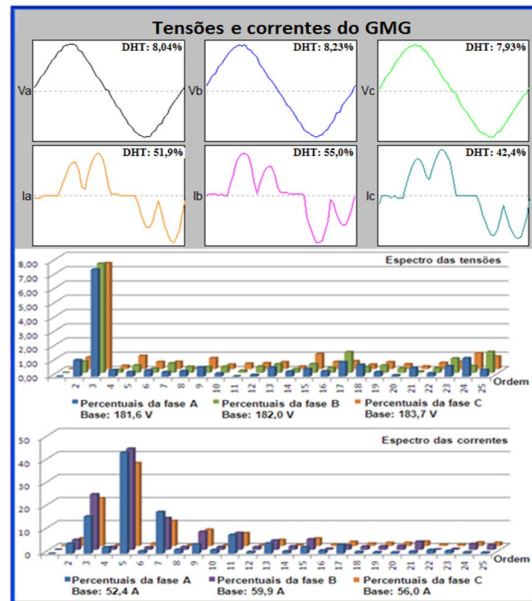
Já as medições feitas no GMG levaram em conta a NBR 14664, de 2001, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece os limites de distorções em 3% para as tensões fase-neutro e em 30% para correntes, quando se trata de geração própria para as telecomunicações.

Na Figura 6 são mostrados os resultados obtidos com o GMG, cujas distorções de tensão foram bem superiores às da concessionária nas três fases, superando em muito o limite especificado pela NBR 14664 da ABNT (2001).

Observa-se ainda que embora a maior distorção ocorra na fase B (8,23%), existe um equilíbrio entre as fases, visto que a diferença obtida entre as mesmas não foi significativa. Este resultado também pode ser visto nas correntes, cuja maior distorção ocorreu na fase B (55,0%).

Na Figura 5 são mostrados, ainda, que as correntes trifásicas apresentaram valores acima do estabelecido na NBR 14664, que é de 30%, e que o comportamento da distorção em termos da ordem da componente harmônica foi diferente entre as tensões e as correntes. Enquanto que, para as correntes, a 5ª harmônica voltou a apresentar os valores mais elevados, principalmente em função do retificador presente no sistema, a 3ª harmônica das tensões superou as demais. Entretanto, não houve variação considerável na DHT das correntes quando se compara a concessionária com o GMG nas três fases.

Figura 5 - Componentes harmônicos e formas de onda das tensões e das correntes (carga alimentada pelo GMG)



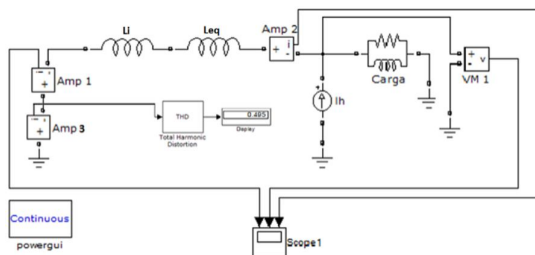
É importante salientar que o GMG foi mais susceptível a influência da carga, visto que a impedância de curto-circuito do barramento alimentado pelo GMG é maior do que a do mesmo barramento alimentado pela concessionária.

Considerando-se que a distorção média de todas as correntes foi superior a 50%, será necessário um estudo mais aprofundado do sistema elétrico em estudo, bem como a instalação de dispositivo de atenuação, em particular da quinta harmônica. Este fato é corroborado com o fato de que as tensões do GMG também tiveram seus valores acima do especificado pela ABNT. A forte presença da quinta harmônica das correntes em ambas as situações é devida ao retificador de seis pulsos, utilizado na planta analisada. A condição do retificador como carga não linear faz com que sua interação com o GMG produza distorções nas tensões. Como a impedância da rede é menor do que a do GMG, as distorções da terceira harmônicas do GMG ficam mais evidentes (ROCHA et al., 2011).

5 SIMULAÇÕES

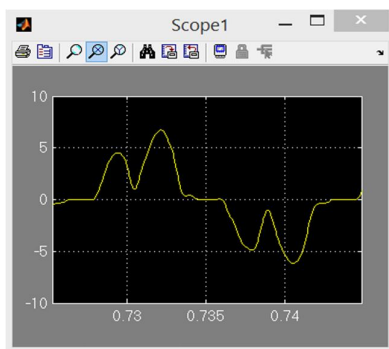
A Figura 6 ilustra o sistema elétrico monofásico modelado no módulo *Simulink*, do aplicativo *MatLab*, com o intuito de simular a forma de onda da corrente fornecida pelo GMG. É possível observar que a fonte de corrente representa o somatório das frequências harmônicas de ordem ímpar, até a décima primeira.

Figura 6 - Modelo do sistema para o GMG



Após a simulação, observou-se que a distorção harmônica registrada para a corrente foi superior a 49% (Figura 9), o que significa uma boa aproximação com o valor registrado na fase A, a qual foi tomada como referência para a modelagem. Obteve-se a forma de onda mostrada na Figura 7, que mostra semelhança com a forma registrada na medição em campo.

Figura 7 - Forma de onda da corrente obtida na simulação com MatLab, antes da inserção dos filtros.



6 PROPOSTAS

Apesar das distorções harmônicas de tensão estarem fora dos limites determinados pelas normas na rede elétrica de uma central telefônica, não foram detectadas alterações nos indicadores operacionais no sistema de supervisão da central telefônica quando houve a comutação da rede em carga para GMG em carga, segundo informações do corpo técnico presente na central.

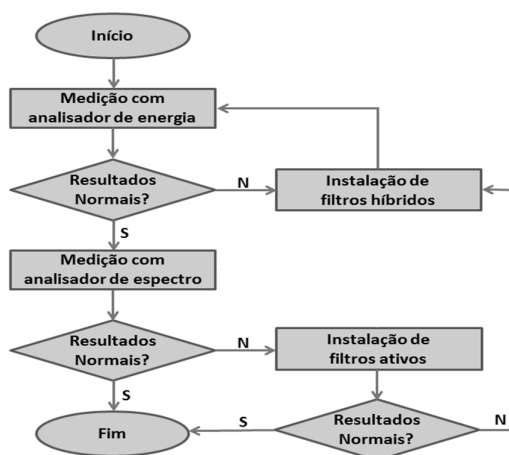
Entretanto, a distorção encontrada exige aprofundamento dos estudos em relação ao sistema de geração, principalmente levando-se em conta que se trata de um sistema telefônico de grande porte e que a instalação de novas cargas não lineares é inevitável. Recomenda-se que as pesquisas adicionais sejam feitas com um analisador de espectro, já que um analisador de energia não possui recursos de sensibilidade nem de faixa de operação quando se trata de harmônicos de ordem superior a 50.

Desta forma, propõe-se que o aprofundamento dos estudos consiste em:

- Efetuar levantamento de todas as variáveis envolvidas, bem como dos equipamentos geradores de distorção harmônica da central telefônica, incluindo-se o próprio GMG;
- Catalogar todas as cargas sensíveis à presença de componentes harmônicas, tais como: transformadores; cabos de alimentação; capacitores para correção de fator de potência; equipamentos

- eletrônicos com acoplamentos indutivos e capacitivos; aparelhos de medição com disco de indução; relés de proteção e fusíveis (transientes oscilatórios em altas, médias e altas frequências) (IEEE, 2000);
- c) Efetuar levantamento das cargas não lineares, as quais representam um elemento preponderante na geração de distorção harmônica;
- d) Efetuar medições com um analisador de espectro para investigar se as componentes harmônicas contidas no transiente durante a comutação da chave S1 e no estado permanente poderão interferir no gerador de base de tempo dos circuitos digitais da central;
- e) Implantar um conjunto de filtros passivos entre a saída do GMG e o barramento do Quadro de Distribuição de Corrente Alternada;
- f) Monitorar continuamente os indicadores de QEE e de telefonia para verificar eventuais correlações, conforme procedimento operacional mostrado no fluxograma da Figura 8. A periodicidade do monitoramento dependerá da curva de variação da corrente, porém recomenda-se que seja feita sempre que houver instalação de novo conversor CA-CA, por ser o principal gerador de distorção harmônica.

Figura 8 - Fluxograma do procedimento operacional sugerido para acompanhamento das distorções



6.1 FILTROS PASSIVOS

Estes filtros são considerados mais adequados em sistemas trifásicos com quatro fios, embora possuam a desvantagem de utilizarem capacitores e indutores com pesos e custos elevados (IRWIN; WILAMOWSKI, 1997).

6.1.1 Filtros Sintonizados

Como proposta de solução, inseriu-se um conjunto com cinco filtros passivos, cada um sintonizado em componentes de ordem ímpar, da terceira à décima primeira. Na Figura 9 é mostrado o circuito equivalente de Norton para o sistema. Nos cálculos dos valores dos componentes, optou-se por manter fixo o valor da capacitância com um valor comercial, variando-se as indutâncias, conforme a Tabela 3, aplicando-se a fórmula:

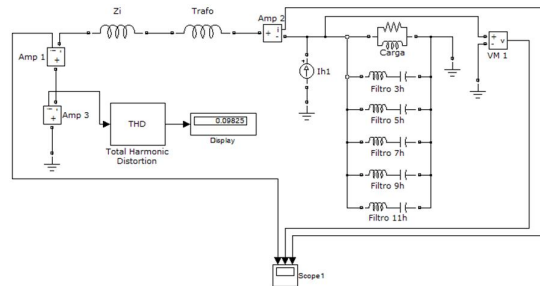
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Tabela 3 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo sintonizado

$f_0 = 60\text{Hz}$	C	L
Filtro 3h	0,000384	0,002036
Filtro 5h	0,000384	0,000733
Filtro 7h	0,000384	0,000374
Filtro 9h	0,000384	0,000226
Filtro 11h	0,000384	0,000151

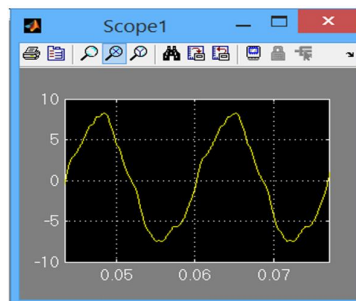
Considerando-se que os valores dos indutores não são comerciais, deverão ser adquiridos sob encomenda.

Figura 9 - Modelo para o GMG, com inserção do filtro



Após a simulação, observou-se que a distorção harmônica registrada para a corrente foi inferior a 10%, obtendo-se a forma de onda mostrada na Figura 10.

Figura 10.- Forma de onda da corrente obtida na simulação com MatLab, após a inserção dos filtros



Os filtros propostos são de baixo fator de qualidade, o que poderá afetar o valor da corrente de saída, porém é de baixo custo. Alternativamente, pode-se optar por valores mais elevados de capacitância, o que elevaria consideravelmente o custo. Portanto, as alternativas de filtro ativo e de inversor multiníveis devem ser consideradas em uma análise técnico-econômica.

Os filtros sintonizados apresentam o inconveniente de entrarem em ressonância para determinada frequência, o que provoca aumento da corrente e, conseqüentemente, aquecimento nos elementos do circuito. Assim, costuma-se instalar filtros dessintonizados com o intuito de evitar a ressonância nas frequências harmônicas e compensar variações de frequências na rede.

6.1.2 Filtros Dessintonizados

Este filtro consiste em inserir um reator em série com o capacitor, sintonizado em uma frequência ligeiramente inferior. Esta diferença produz um desvio denominado fator de dessintonia (δ). Nesta análise, o fator utilizado foi de 5,7%. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos através de processo iterativo com auxílio da planilha Excel. O fator de qualidade apresentou valores bem mais elevados do que nos filtros sintonizados, porém somente para as componentes harmônicas de terceira e quinta ordens o valor foi superior a 30, considerado satisfatório. Não obstante, os valores de capacitância e de indutância para tais componentes podem ser considerados aceitáveis tendo em vista serem as que mais contribuem para a distorção total.

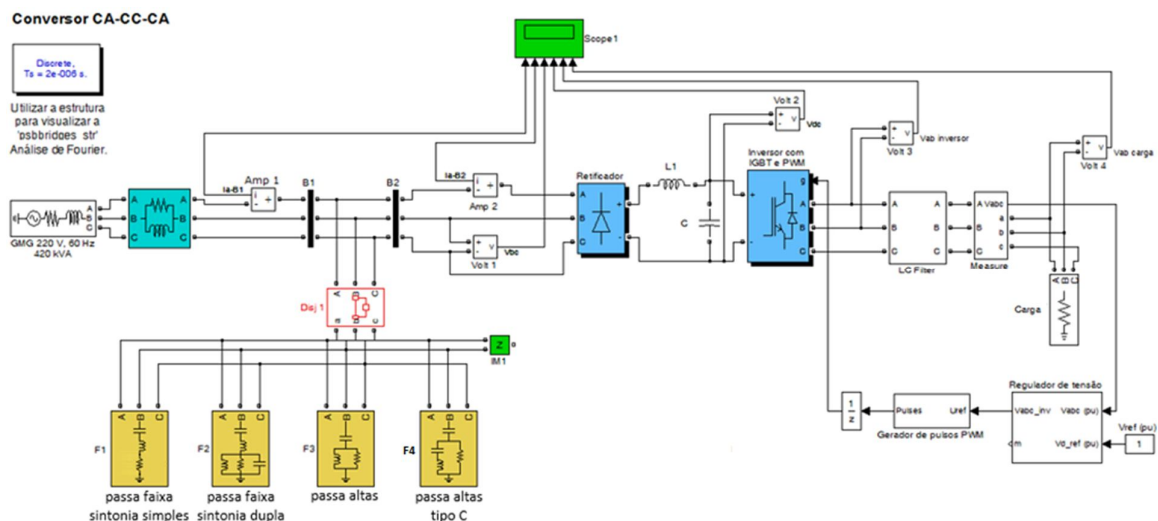
Tabela 4 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo dessintonizado

f_0	C	L	δ	Q	f
180	0,000018	0,04700	5,7	51	173
300	0,000018	0,01800	5,7	32	280
420	0,000018	0,00900	5,7	22	395
540	0,000018	0,00560	5,7	18	501
660	0,000018	0,00370	5,7	14	617

6.1.3 Simulação computacional

Esta simulação foi feita para os filtros propostos, com a utilização de blocos representativos do sistema real do aplicativo MATLAB/Simulink (Figura 11).

Figura 11 - Topologia do modelo em Simulink, com inclusão dos filtros



O primeiro filtro é do tipo passa faixa com sintonia simples, com frequência de ressonância em 20% acima de 120 Hz para redução da segunda harmônica e evitar a ressonância nessa frequência. Ele é formado por um circuito RLC em série e sua impedância equivalente, para $R = 0,1 \, \Omega$, $L = 47 \, \text{mH}$, $C = 37,5 \, \mu\text{F}$, é (CHOU *et al.*, 2000):

$$Z_f = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{Cs} \quad (2)$$

O segundo filtro é um passa faixa, desta vez com dupla sintonia. A frequência de corte inferior selecionada é adjacente à do filtro de sintonia simples, ou seja, 120 Hz, com o intuito de reforçar a atenuação da segunda harmônica. A de corte superior corresponde à 23ª harmônica, em decorrência do fato de que as harmônicas de ordem mais elevada são aquelas que mais podem afetar um circuito telefônico, pois a faixa deste está entre 300 e 4000 Hz. A topologia deste filtro, obtido com $R = 15 \, \Omega$, $L = 6,8 \, \text{mH}$, $C = 6,5 \, \mu\text{F}$, apresenta um circuito ressonante em série e outro em paralelo e sua impedância equivalente é representada pela expressão (CHOU *et al.*, 2000):

$$Z_f = \frac{RL^2C^2s^4 + L^2Cs^3 + 3RLCs^2 + Ls + R}{RLC^2s^3 + LCs^2 + RCs} \quad (3)$$

Por se tratar de um filtro passa faixa, a seletividade torna-se um aspecto mais crítico. Assim, optou-se por um valor mínimo de 20 para o fator Q , o que proporciona boa seletividade e implica em um valor de 47 ohms para o resistor.

Este filtro considera a média geométrica das harmônicas quinta e sétima (MATHEWORKS, 2011). Assim, temos:

$$f_{hm} = \sqrt{f_5 \cdot f_7} \cong 355 \, \text{Hz} \quad (4)$$

Em seguida, vem um filtro passa altas sintonizado na terceira primeira harmônica, com $R = 52 \, \Omega$, $L = 3,3 \, \text{mH}$, $C = 230 \, \mu\text{F}$, cuja impedância equivalente é (CHOU *et al.*, 2011):

$$Z_f = \frac{RLCs^2 + Ls + R}{LCs^2 + RCs} \quad (5)$$

O fator de qualidade deste filtro está situado em um valor intermediário, isto é, igual a 7. Adotando-se os mesmos valores para L e C dos filtros anteriores, chega-se a 52 ohms para o valor do resistor.

Finalmente, tem-se o filtro passa altas tipo C, sintonizado em 300 Hz, pois esta componente é bastante elevada no tipo de carga não linear analisada. Optou-se por um fator de qualidade de 2. Um valor mais elevado apresentaria a vantagem de ser mais seletivo, porém com a desvantagem da maior complexidade, principalmente em se tratando de frequências baixas. A função do resistor é limitar a impedância do filtro nas frequências altas, enquanto que o segundo capacitor (C') tem a função de sintonizar o filtro na frequência fundamental, evitando as perdas em 60 Hz. A impedância equivalente deste filtro, obtido com $R = 52 \, \Omega$, $L = 8,2 \, \text{mH}$, $C = 95 \, \mu\text{F}$ e $C' = 857 \, \mu\text{F}$, é fornecida por (CHOU *et al.*, 2011):

$$H(s) = \frac{LCC's^3 + LC's^2 + (C + RC')s + 1}{LCC's^3 + RCC's^2 + Cs} \quad (6)$$

Na Figura 12 (a e b) são mostrados os diagramas com as distorções reduzidas de forma acentuada após a inserção dos filtros, comparativamente aos diagramas da Figura 4-32. A distorção da corrente foi reduzida para 2,93% e a da tensão para 2,98%. O valor da distorção de tensão obtida está abaixo do limite estabelecido pela ABNT (NBR 14664, 2001), que é de 3%. Na Figura 13 é mostrada a curva de variação da impedância em função da

frequência, na qual pode-se observar as atenuações correspondentes a cada uma das harmônicas consideradas no dimensionamento dos filtros.

Figura 12 - Sinais de corrente e tensão com a simulação alternativa em *Simulink*, após a inserção dos filtros

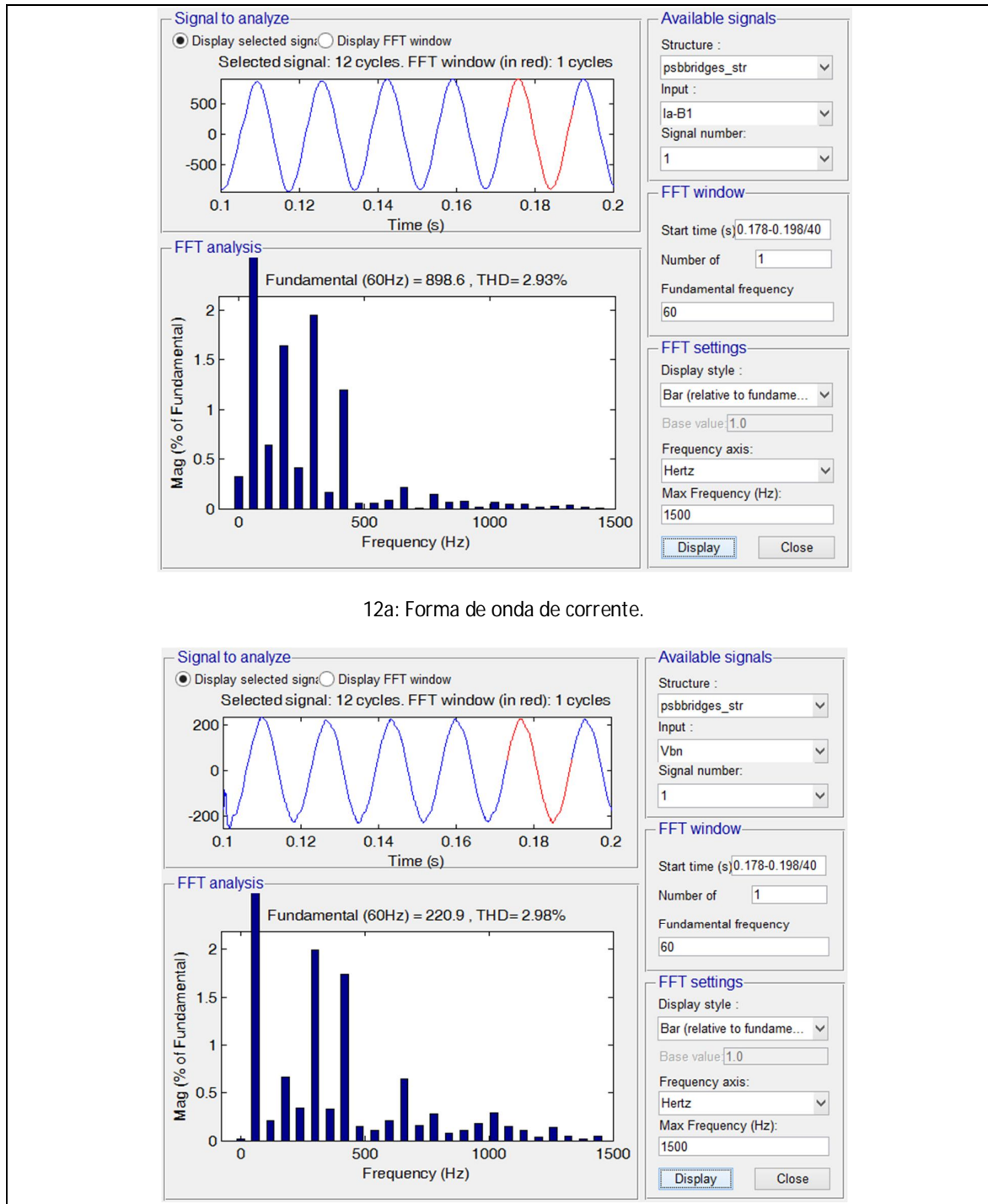
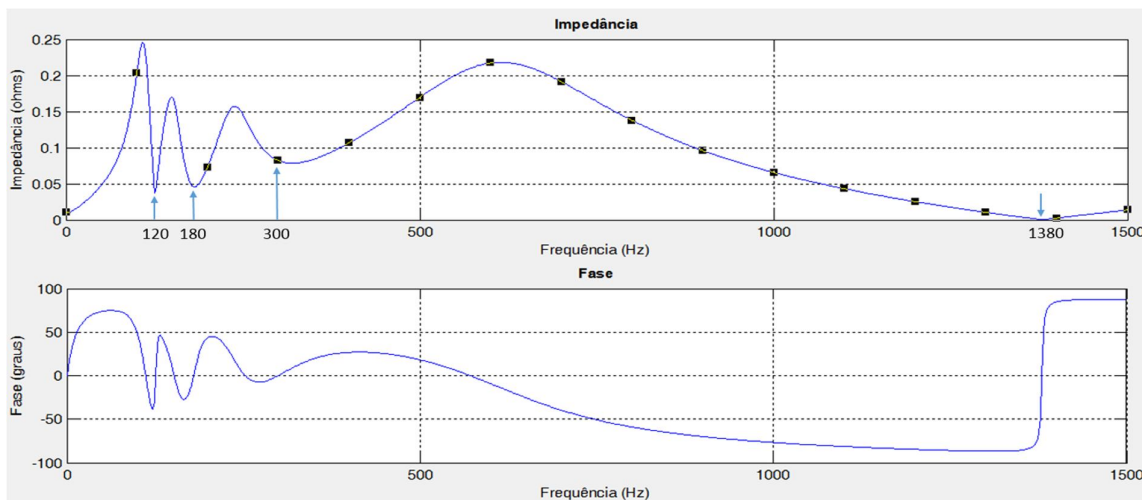


Figura 13 - Curva da impedância resultante com o conjunto dos filtros inseridos



Este capítulo procurou mostrar a viabilidade da redução da distorção com filtros passivos instalados no barramento do quadro de distribuição do barramento essencial do GMG. Os filtros passivos apresentam a vantagem de não utilizarem componentes a semicondutores e, por isso, com menor incidência de defeitos, com redução do custo de manutenção.

7 CONCLUSÃO

A contribuição deste trabalho reside no fato de que, durante a pesquisa bibliográfica, não foram encontradas publicações que abordassem especificamente a distorção harmônica no sistema de geração própria de uma Central Telefônica. Embora existam alguns trabalhos relativos aos sistemas telefônicos em conjunto com qualidade da energia elétrica, estes analisam as interrupções e, eventualmente, ruídos periódicos e aleatórios.

As medições realizadas em campo permitiram confirmar que o barramento do quadro de distribuição de corrente alternada alimentado pelo GMG apresenta maior distorção do que quando é alimentado pela rede da concessionária.

A análise qualitativa, realizada com osciloscópio, confirmou a presença da distorção harmônica, tanto com a carga alimentada pela concessionária como pelo GMG. Quanto à análise quantitativa, não houve alterações substanciais nas distorções das correntes quando se compara a alimentação pela rede com a alimentação pelo GMG, resultado previsível uma vez que a distorção é causada pela carga não linear da própria central. No que tange às distorções de tensão da rede, houve conformidade em relação à recomendação da ANEEL. Porém, quando se tratou do GMG, tanto os valores de tensão quanto os de corrente ultrapassaram os limites recomendados pela NBR 14664 da ABNT.

Apesar das distorções existentes, não foram detectadas alterações dos indicadores operacionais, conforme análise do banco de dados pelo corpo técnico da concessionária estudada. Entretanto, há fortes indícios de impacto sobre os indicadores, mas que não são revelados por se tratarem de informações sensíveis.

Foram feitas simulações computacionais com o aplicativo MATLAB, inicialmente com o circuito equivalente baseado no Teorema de Norton e, em seguida, com diagrama de blocos representativos dos

diversos subsistemas. Tais modelagens possibilitaram a apresentação de propostas adicionais na solução do problema. Tais simulações utilizaram grandezas com valores que permitissem a maior semelhança possível com as formas de onda obtidas nas medições em campo. Assim, as resistências, indutâncias e capacitâncias tiveram seus valores reajustados de forma que foram obtidas aproximações com erro de 1,7% para a tensão e de 2,2% para a corrente. Neste caso, o menor erro para a corrente foi de grande importância porquanto as distorções das correntes são mais danosas na produção de interferência eletromagnética em uma central telefônica. Em razão disto, o foco deste trabalho foram as correntes.

Após as simulações para compatibilizar o modelo adotado, foram apresentadas propostas com filtros passivos. Inicialmente, foram propostos filtros sintonizados e não sintonizados a serem instalados próximos à FIE, com base no modelo aplicando o Teorema de Norton. Em seguida, foi apresentado um modelo com a instalação de quatro conjuntos de filtros trifásicos sintonizados nas harmônicas de ordens terceira, quinta, sétima e décima primeira, por serem as que mais contribuíram para as distorções. O local de instalação proposto foi no próprio barramento do QDCA das cargas essenciais, com base em que as cargas não lineares estão distribuídas por diferentes andares do prédio.

As simulações com os filtros feitas com o MATLAB produziram uma curva de impedância versus frequência com baixos valores nas componentes para as quais os filtros foram sintonizados, respectivamente. As baixas impedâncias permitiram que as distorções de tensão baixassem de 8,23% para 1,7% e as de corrente de 55,47% para 2,2%, em números aproximados. Estes valores tomaram como referência as grandezas da fase B, por ter sido a que mais apresentou distorções. Vale ressaltar que, apesar de um sistema de pequeno porte em relação ao de uma concessionária, não se trata de um sistema equilibrado.

Não obstante os filtros terem se mostrado viáveis em termos de simulação computacional, é necessária uma avaliação técnico-econômica que abranja a inclusão de filtro ativo e inversor multiníveis na análise, juntamente como a implementação de pesquisas aprofundadas, já que as distorções aumentarão com o inevitável crescimento das cargas não lineares.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as colaborações da prestadora de serviço telefônico, da Universidade Salvador (UNIFACS) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio disponibilizado no decorrer dos trabalhos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 01 de fevereiro de 2012. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL), 19 de junho de 2002. Plano Geral de Metas de Qualidade – PGMQ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2001. NBR 14664: Grupos geradores – Requisitos gerais para telecomunicações. Rio de Janeiro. 11.p.

- BEATY, H.; DUGAN, R.; McGRANAGHAN, M. e SANTOSO, S., 2012. Electric power systems quality 3rd ed. McGraw Hill, Nova Iorque.
- BHUVANESWARI, G.; SINGH, B. e SINGH, S., 2011. Power Quality Improvement in Telecommunication Power Supply System Using Buck Rectifier. In: IEEE Annual India Conference, 2011, Hyderabad, India. Anais ... Danvers, EUA: IEEE Conference Publications. p. 1-4.
- CACIOTTA, M.; GROSSONI, M.; LECCESE, F., 2008. Power Quality Measurements in Telecommunication Exchanges Delivery Points. In: IEEE International Telecommunications Energy Conference, 30, San Diego, EUA. Anais... Danvers, EUA: IEEE Conference Publications. p. 1-5.
- CHOU, C. J.; ; LEE, J. Y.; LEE, K. D.; LIU, C. W. Optimal Planning of Large Passive-harmonic-Filters Set at High Voltage Levels. IEEE Transactions on Power Systems, v.15, n.1, p.433-441, fev. 2000.
- COLNAGO, G. P.; MACEDO JR., J. R.; SOUSA, G. C. D.; VIEIRA, J. L. F., 2011. A Nova Norma de Qualidade de Energia Elétrica Brasileira e um Medidor de Baixo Custo. Artigo publicado no IX Congresso Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE). Cuiabá.
- CRUZ, H. C.; PESSANHA, J. E. O., 2013. Investigação da Qualidade de Energia em um Centro de Lançamento de Foguetes. Artigo publicado no X Congresso Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE). Lindóia.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A., 2005. Condicionamento de energia e dispositivos FACTS. Campinas, SP. DSCE FEE Unicamp.
- INTERNATIONAL ELECTROMECHANICAL COMMISSION (IEC), 2005. Harmonics Standard IEC 61000-3-2 Ed. 3.
- IRWIN, J. D.; WILAMOWSKI, J. D. Industrial Electronics Handbook. Cleveland, EUA. CRC Press, 1997.
- JESZENSKY, P. J. E., 2004. Sistemas Telefônicos. Manole, Barueri, SP.
- LECCESE, F., 2007. Rome, a First Example of Perceived Power Quality of Electrical Energy: the Telecommunication Point of View. In: International Telecommunications Energy Conference, 29., 2007, Roma. Anais ... Danvers, EUA: IEEE Conference Publications. p. 369-372.
- RASHID, M. H., 1999. Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo: Makron Books do Brasil.
- ROCHA, J. E.; GLODZIENSK, G.; MASCARI, L.; PAZINATO, M. S., 2011. Fluxo Harmônico em Planta Comercial na Presença de Grupo Gerador. 96 f. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Técnica Federal do Paraná – UTFPR.
- THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE (1992). Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems – IEEE Std 519. New York.
- THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE), 2000. Protective relaying and power quality – IEEE PSRC Working Group Report. New York.